

무인헬리콥터의 고도제어를 위한 TSK형 퍼지제어기 설계

TSK Type Fuzzy Controller Design for Altitude Control of an Unmanned Helicopter

김종권*, 성기준**, 조겸래***, 장철순*

Jong-Kwon Kim*, Ki-Jun Seong**, Kyeum-Rae Cho*** and Chul-Soon Jang*

요 약

본 연구에서는 산업용 무인 헬리콥터의 자율비행을 위한 일환으로 퍼지 제어기를 이용하여 고도제어를 하였다. 본 논문에서는 가솔린 엔진을 사용하는 전장 3m급의 무인 헬리콥터를 설계하고 이의 재원을 이용하여 Takagi-Sugeno-Kang 형의 퍼지 제어기법으로 고도 제어기를 구성하였다. 목표 고도값과 고도의 오차, 그리고 속도를 이용하여 입력 선형 멤버쉽 함수를 생성하였다. 이렇게 구성된 멤버쉽 함수를 이용 제어입력을 생성하였고, 생성된 제어입력을 이용하여 메인 로터의 피치를 제어하고 그 결과를 이용하여 속도와 고도를 구하였다. 시뮬레이션을 통하여 설계한 퍼지제어기의 고도제어 성능을 평가하였다.

Abstract

An altitude control using a fuzzy controller was performed for a series of research for autonomous flight control of industrial unmanned helicopters. The 3m class gasoline engined unmanned helicopter was designed, and using the designed specifications, Takagi-Sugeno-Kang type fuzzy controller was designed. The input membership functions were generated using target altitude, altitude error and velocity of unmanned helicopter. With these membership functions, the control inputs for altitude control were calculated. These control input signal can control the main rotor's pitch and determine the velocity and altitude of the unmanned helicopter. Also, the altitude control performance of the designed fuzzy controller was evaluated by computer simulations

Key words : Fuzzy Controller, UAV Helicopter, Altitude Control

I. 서 론

헬리콥터는 1940년대에 오토자이로 이론이 만들어진 후 끊임없이 발전되어 왔다. 고정익 비행기가 할 수 없는 기동성, 수직 이착륙과 제자리 비행 능력

으로 군과 민간에서 각광받으며 여러 방면에 응용되어져왔다. 하지만 이러한 장점을 가지고 있음에도 불구하고 고정익 항공기에 비해서 발전이 더뎠는데, 그 이유는 무엇보다 복잡한 기구학과 로터의 회전만으로 이륙할 수 있는 고출력 엔진의 개발이 어렵고

* (주)신동디지텍 (Shin-Dong Digitech Co. Ltd.)

** 넥스원퓨처(주) (Nex1 Future Co. Ltd.)

*** 부산대학교 항공우주공학과(Department of Aerospace Engineering, Pusan National University)

· 제1저자 (First Author) : 김종권

· 접수일자 : 2005년 8월 3일

회전하는 로터로 인해서 각 운동 간의 연성이 강하여 모델링과 설계가 쉽지 않았기 때문이다. 하지만 꾸준한 수요의 증가와 실용성으로 인해서 많은 기업과 연구소에서 연구가 진행되고 있다.

무인 헬리콥터는 실제 헬리콥터의 대부분의 성능을 갖추고 있는 등의 많은 장점을 가지고 있기 때문에 무인 헬리콥터의 응용분야는 매우 광범위 하여 구조 활동, 산불과 수질감시, 농약살포 등과 같이 널리 이용 되어지고 있다. 또 실제로 필름 카메라를 장착한 무인 헬리콥터로 항공영상촬영, 영화촬영, TV 다큐멘터리를 위한 촬영에도 사용된 적이 있다. 하지만 무인 헬리콥터의 응용은 아직 지상 조종사가 직접 조종하는 수준이어서 지상 조종사에게 시야가 확보되지 않는 공간에서는 위험이 따른다. 그래서 최근에는 자율조종 무인 헬리콥터의 개발이 상당히 진행되고 있으며 많은 대학과 연구소에서 무인헬리콥터의 자율비행과 자율임무수행 시스템 개발에 많은 관심을 보이고 있다.

무인 헬리콥터의 성공적인 자율비행 제어기를 구성하기 위해 제어 대상인 비행체의 정확한 동특성이 파악되지 않으면 안정한 제어기를 구성하기가 힘들다. 비행체 제어에 기존의 제어 기법들은 선형화 시킨 PID 기법을 주로 사용 하였으나 헬리콥터의 복잡한 동역학을 포함한 헬리콥터와 같은 비선형 운동에 대해서는 잘 표현되지 않았다. 또한 고속 비행, 기동 비행, 다기능을 수행하기 위해 설계 되었지만 비행영역의 확대와 기동성 증대에 따른 이론의 불확실성 및 외란에 대한 성능저하가 시스템에 나타나고 있다. 특히, 무인헬리콥터의 경우 그 동특성이 실제 헬리콥터에 비하여 빠르므로 이러한 비선형성에 매우 취약하다. 이러한 문제점을 극복할 수 있는 대안 중에서 한 가지가 비선형성을 어느 정도 고려할 수 있는 퍼지 제어기이며, 복잡한 비선형 시스템을 표현하기 위해 여러 가지 퍼지 모델링 기법이 활발히 연구되어 왔다 [1, 2, 3, 4]. Zadeh에 의해 최초로 도입된 퍼지 논리 개념은 각계에서 새로운 가능성을 보여주었다. Tong은 퍼지 논리를 바탕으로 시스템을 묘사하는 퍼지 모델링 기법을 시도하여 복잡한 비선형 시스템의 모델링에 새로운 접근 방법을 제시하였다. 그 후, Pedrycz는 상대 퍼지 집합과 Zadeh의 조건 확률 분

포에 기초하여 퍼지 시스템의 새로운 동정 알고리즘을 제안하였고, Xu는 퍼지 규칙의 구조와 파라미터 동정과 연관된 자기 학습 알고리즘을 포함하는 일반적인 퍼지 시스템 동정 기법을 제안하였다. Sugeno는 선형적 지식이 없는 시스템의 입출력 데이터만으로 시스템의 정성적 모델을 구하는 방법과 규칙의 후반부를 선형식으로 대체하는 방법으로 퍼지 모델 동정의 일반적 기법을 제안하였다. 본 논문에서는 퍼지 제어기법을 사용하여 무인 헬리콥터의 고도를 시뮬레이션으로 제어 하고자 한다. 본 논문에서는 무인 헬리콥터의 고도제어기를 Takagi- Sugeno- Kang형의 퍼지 제어기법을 사용하여 구성하고 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 평가하였다.

II. 헬리콥터 모델

2-1 헬리콥터 상하운동 모델링

헬리콥터의 상하운동에는 메인로터 (main rotor)의 피치각과 엔진의 추력이 매우 중요하다. 헬리콥터의 상하 운동에서 나타나는 힘의 관계는 그림1과 같다.

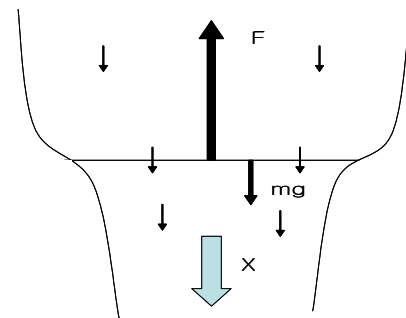


그림 1. 헬리콥터에 나타나는 힘의 관계
Fig. 1. Force Relation of Unmanned Helicopter.

여기서 F 는 헬리콥터에 전체적으로 나타나는 수직 상승 방향의 힘(추력 및 양력)이고 X 는 수직방향의 저항요소이다.

위의 역학관계를 나타내면 식(1)과 같다.

$$ma = F + \text{sign}(-v)|X| - G \quad (1)$$

여기서 m , a , v , G 는 각각 헬리콥터의 질량, 가속도, 속도, 그리고 무게이다.

또한 각각의 양력 및 항력의 관계식은 다음 식 (2)와 (3)과 같다.

$$F = f(\theta)K_{gt}G \quad (2)$$

$$X = \text{sign}(-v) \frac{C_l S \rho}{2} v^2 \quad (3)$$

여기서, $f(\theta)$ 는 헬리콥터 전체의 메인로터의 피치각과의 양력의 관계이다. 여기서는 실험으로 얻은 측정값을 근사화시켜 정리하여 다음 식(4)와 같이 사용하였다.[1, 2]

$$f(\theta) = \text{sign}(\theta) \times 8.1 \times 10^{-4} \times \theta^2 \quad (4)$$

그리고, θ 는 메인로터의 피치각, K_{gt} 는 무게 유동성을 고려한 여유계수이고, C_l 은 블레이드의 양력계수, S 는 블레이드를 위에서 본 면적, ρ 는 공기밀도이다. 최종적인 모델식을 관련하여 정리하면 다음 식 (5)와 (6)과 같다.

$$\dot{v} = \frac{X + F - G}{m} \quad (5)$$

$$\dot{H} = v \quad (6)$$

그리고 블레이드 각도변화에 반응하는 방정식은 다음과 식(7)과 같다.

$$\theta = K_\theta(u - \dot{v}) \quad (7)$$

위의 H 는 고도이며, K_θ 는 제어 전달 계인 값이고 u 는 제어 입력 값(목표가속도)이다.

제어기를 설계하기 위한 식은 아래와 같다.

$$v_{t+1} = \frac{F_t + X_t - G}{m} \nabla t + v_t \quad (8)$$

$$H_{t+1} = v_t \nabla t + H_t \quad (9)$$

$$F_t = f(\theta)K_{gt}G \quad (10)$$

$$X_t = \text{sign}(-v_t) \frac{C_l S \rho}{2} v_t^2 \quad (11)$$

$$\theta_{t+1} = K_\theta \left(u - \frac{v_t - v_{t-1}}{\nabla t} \right) \nabla t + \theta_t \quad (12)$$

위의 식에 본 연구에서 설계한 3m급 가솔린 헬리콥터의 설계 사양 값을 대입하면 각각의 값은 다음과 같다. 그림 2는 설계한 3m급 무인헬리콥터의 평면도를 나타낸다.

$$g = 9.8 [m/s^2], K_{gt} = 1.2, m = 60 [kg],$$

$$G = 588 [N], C_l = 0.5, S = 7.55 [m^2],$$

$$\rho = 1.225, K_\theta = 0.1, \nabla t = 0.01 [sec],$$

$$v_0 = 0 [m/s], H_0 = 0 [m]$$

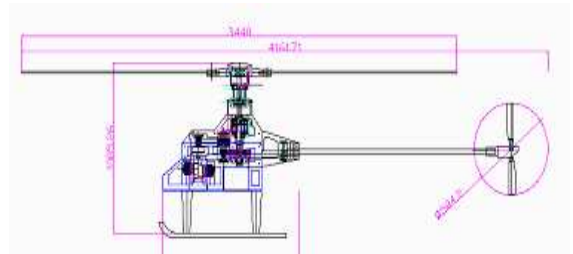


그림 2. 무인 헬리콥터의 평면도
Fig. 2. 2-D Drawing of Unmanned Helicopter.

III. 퍼지 모델

3-1 Fuzzy 제어기 설계

퍼지집합 이론의 연구는 인간의 사고와 행동에 관련된 부정확함과 애매한 현상의 의미를 수학적으로 접근하여 증명하기 위해 시도 되었다. 본 논문에서는 무인 헬리콥터의 고도제어기를 Takagi-Sugeno 형의 퍼지 제어기법을 사용하여 구성하고 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 평가하였다. 다음 그림 3의 블록다이어그램에서는 고도제어 대상인 무인 헬리콥터의 목표고도 값과 속도 값, 그리고 고도 차이(Error)값을 이용한 퍼지 제어기를 통하여 제어입력 이 u (목표가속도)를 도출함을 보여준다.

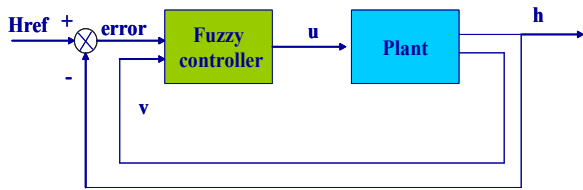


그림 3. 제어기의 블록 다이어그램
Fig. 3. Block diagram of Altitude Controller

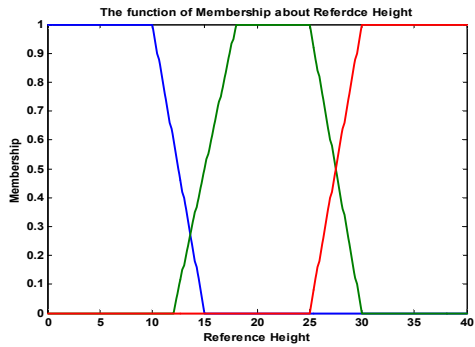


그림 4. 목표고도에 대한 멤버십 함수
Fig. 4. Membership Function for Target Altitude

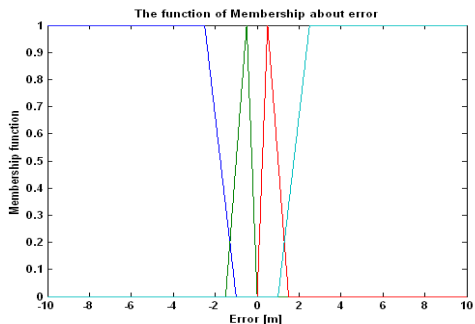


그림 5. Error 값에 대한 멤버십 함수
Fig. 5. Membership Function for Error

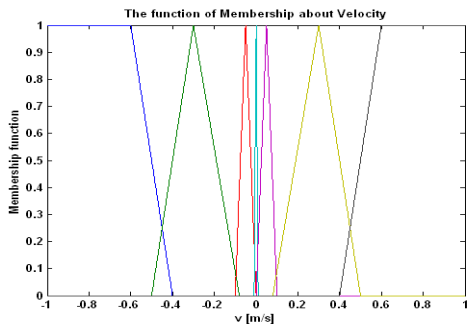


그림 6. 속도에 대한 멤버십 함수
Fig. 6. Membership Function for Velocity

표 1. 목표고도와 에러와의 관계

Table 1. Relationship between Altitude and Error

		Href		
		L	M	H
Error	PB	f ₁	f ₂	f ₃

표 2. 속도와 에러와의 퍼지 출력

Table 2. Fuzzy Output Values for Velocity and Error

		v						
		PF	PM	PL	ZE	NL	NM	NF
Error	PS	f ₄	f ₅	f ₆	f ₇	f ₈	f ₉	f ₁₀
	NS	f ₁₁	f ₁₂	f ₁₃	f ₁₄	f ₁₅	f ₁₆	f ₁₇
	NB	f ₁₈	f ₁₉	f ₂₀	f ₂₁	f ₂₂	f ₂₃	f ₂₄

각각의 입력 값에 대한 멤버십 함수의 형태는 왼쪽의 그림 4~6과 같다. Takagi-Sugeno-Kang 형 퍼지 제어기법을 사용하여 정리하면 각각의 퍼지출력은 표 1과 표 2로 요약된다.[3]

여기서, 사용되는 PB는 'Positive Big' 이고 PS는 'Positive Small', NS는 'Negative Small', L는 'Low altitude', M는 'Middle altitude', H는 'High altitude', PF는 'Positive Fast', PM은 'Positive Medium', PL은 'Positive Slow', ZE는 'Zero', NL은 'Negative Slow', NM은 'Negative Medium', 그리고 NF는 'Negative Fast' 이다.

위의 값에서 f₁(H_{ref})는 다음 식 (13)과 같다.

$$f_1(H_{ref}) = (8.95 \times 10^{-13}t^4 - 1.99 \times 10^{-9}t^3 + 1.55 \times 10^{-6}t^2 - 0.00048t + 0.0427)H_{ref} \quad (13)$$

그 외 함수는 $c \times Error$ 형태이다(c는 상수). 앞의 퍼지 함수를 이용하여 나온 제어입력 값, 메인로터 피치 값, 상승속도 및 고도의 시간에 따른 변화값은 각각 그림 7, 8, 9, 10과 같다.

속도에 영향을 미치는 제어입력은 결과를 분석해 보면 40초 까지 포물선형태의 함수를 유지하고 그

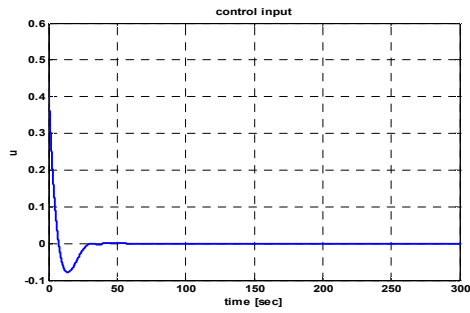


그림 7. 시간에 따른 제어입력의 변화
Fig. 7. Control Input with time

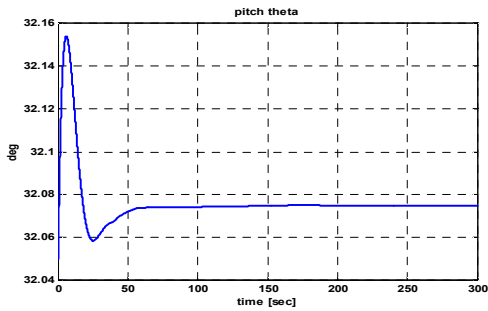


그림 8. 시간에 따른 메인로터 피치의 변화
Fig. 8. Pitch Variation of Main Rotor with time

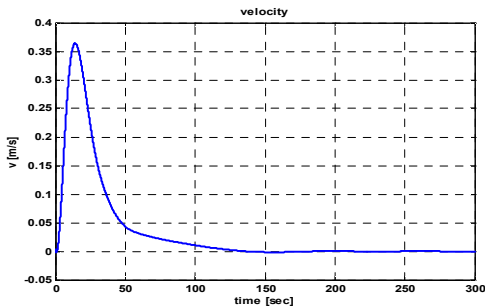


그림 9. 시간에 따른 상승속도의 변화
Fig. 9. Variation of Rising Velocity with time

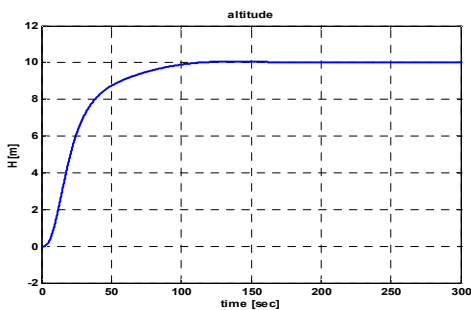


그림 10. 시간에 따른 고도의 변화
Fig. 10. Variation of Altitude with time

뒤 120초까지 미세한 변화를 이룬다. 이것은 40초부터 오차 값이 PS영역으로 들어감을 알 수 있다. 속도는 15초에서 최고 0.36 m/s의 상승속도를 가지고 차차 감소 후 수렴한다. 고도는 2% 수렴 영역에서는 63초에 수렴하고 최대 1.2%의 오버슈트가 발생한다. 그리고 150초안에 완전히 수렴함을 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과를 분석해보면 약 1분이 지나서 안정적인 고도를 유지할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

헬리콥터의 고도제어를 위한 상하 운동 방정식은 비선형 방정식으로 선형화가 어렵고 매우 정교한 제어를 필요로 한다. 그래서 본 연구에서는 헬리콥터의 고도제어를 위한 비선형 운동을 해석하였고 퍼지 제어기를 설계하여 만족할 만한 성능을 얻었다. 크게 초기영역의 일반화된 함수와 후기의 정밀 제어 영역으로 구분하여 보다 빠르고 정밀한 결과를 얻을 수 있었다. 본 논문에서 사용한 퍼지제어기는 실제 무인헬리콥터의 고도제어 프로세서에 탑재 가능할 수 있도록 간소화 하여 요구되는 성능을 만족할 수 있도록 설계하였다. 앞으로는 실제 헬리콥터에 장착 실험하여 전체의 양력 값 및 제어 게인 값을 검증하고 시뮬레이션 결과와 비교해 보아야 할 것이다. 또한 앞으로 실험시의 정밀 제어 부분을 효율적으로 구현하는 방안에 대하여 고려해 보아야 할 것이다.

차후 계속 수행되어질 연구에서는 적응퍼지제어기를 이용한 무인헬리콥터의 고도제어와 다양한 외부 환경 하에서의 강인한 고도제어기에 관한 연구와 개발한 알고리즘의 검증에 위한 시험 및 성능평가 및 실제 실험에 관한 연구가 계속 진행 될 것이다.

후 기

본 연구는 산학협동재단의 학술 연구비 지원에 의한 것임을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 성기준, 김종권, 조겸래, 이대우, "퍼지제어기를

이용한 헬리콥터 고도제어에 관한 연구," 춘계항공우주학술 발표대회, 2004.

- [2] 왕현민, 허경무, 우광준, "개선된 신경망을 이용한 헬리콥터 고도 제어기의 설계," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 7, No. 3, March, 2001.
- [3] 이상배, *퍼지-뉴로제어 시스템*. (주) 교학사.
- [4] 박민용, 최항식, *퍼지 제어 시스템*. 대영사.
- [5] 이수갑, 최기영, 장세명 공역, *헬리콥터 공학*. 도서출판 인터비전.
- [6] 이현엽, 문경일 공저, *MATLAB을 이용한 퍼지뉴로*. 도서출판 아진.
- [7] 류정현, 류시대, 안성준, 박범진, 석진영, "퍼지기법을 이용한 헬리콥터의 중운동 비행제어,"

춘계항공우주학술 발표대회, 2004.

- [8] Raner Palm, Dimiter Driankov and Hans Liellend oorn, "Model Base Fuzzy Control," Springer, 1996.
- [9] Mohammad Jamshidi, Nader Vadiie and Timithy J, Ross, "Fuzzy Logic and Control : Software and Hardware Applications," Vol 2, Prentice Hall, 1993.
- [10] J. S. Roger Jang and Ned Gulley, "Fuzzy Logic ToolBox," Mathworks.
- [11] G.C. Hwang and S. C. Lin, "A Stability Approach to Fuzzy Control Design for Nonlinear Systems," Fuzzy Sets and Systems, Vol.48. pp.279 287, 1992.

김 종 권(金鍾權)



1994년 2월 : 부산대학교 항공우주공학과(공학사)
 1996년 2월 : 부산대학교 항공우주공학과(공학석사)
 2005년 2월 : 부산대학교 항공우주공학과(공학박사)

2005년 2월~현재 : (주)신동디지텍 부설연구소 연구소장
 관심분야 : 임베디드 시스템, UAV Tracking Antenna,

조 검 래(趙謙來)



1977년 2월 : 부산대학교 기계공학과(공학사)
 1979년 2월 : 부산대학교 기계공학과(공학석사)
 1980년 : 조지아 공과대학 기계공학과(공학석사)

1986년 : 텍사스 주립대학(오스틴) 항공우주공학과(공학박사)
 1986년 4월~현재 : 부산대학교 항공우주공학과 교수
 관심분야 : 인공위성 시스템, 궤도해석, 임무해석

성 기 준(金鍾權)



2003년 2월 : 부산대학교 항공우주공학과(공학사)
 2005년 2월 : 부산대학교 항공우주공학과(공학석사)
 2001년 3월~현재 : 넥스원퓨처(주) 연구원

관심분야 : 임베디드 시스템, RTOS, Micro-Controller, IR Seeker, MIMO Control Theory.

장 철 순(張哲淳)



1994년 2월 : 한국해양대학교 기관학과(공학사)
 1994년7월~현재 : (주)신동디지텍 대표이사
 관심분야 : 이동체 통신 시스템, 위성 통신 시스템, 항해 통신 시스템